

Сучасні системи технологій у машинобудуванні: Зб. наук. праць, присвяч. 90-річчю з дня народж. професора Одес. нац. політехн. ун-ту Якимова О. В., Дніпропетровськ, 2015, с. 128-133

УДК 621.923

Ю.Г. Гуцаленко, ст. науч. сотрудник

НТУ "ХПИ", ул. Фрунзе, 21, Харьков, Украина, 61002

## ВЗАИМОСВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ РЕЖУЩЕГО РЕЛЬЕФА АЛМАЗНОГО КРУГА С ШЕРОХОВАТОСТЬЮ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ ОБРАБОТКИ ПРИ УСТОЙЧИВОМ ШЛИФОВАНИИ

*Получены взаимосвязанные с параметрами рельефа алмазного круга аналитические выражения шероховатости и производительности обработки. Практическая имплементация расчетного подхода возможна при обеспечении устойчивости параметров рельефа инструмента в условиях алмазно-искрового шлифования с управлением электрическими режимами их стабильной реновации за счет поддержания темпа эрозионного разрушения связки электрическими разрядами, согласованного с контактным износом режущих зерен.*

Ключевые слова: алмазный круг, режущий рельеф, устойчивое шлифование, шероховатость поверхности, производительность обработки.

**Введение.** Варьирование высотными параметрами режущего рельефа круга данной характеристики при устойчивом шлифовании позволяет добиваться и улучшенной шероховатости обработанной поверхности при работе инструментом с повышенным притуплением режущих зерен в условиях обеспечения умеренного темпа принудительного изнашивания связки, и повышенной производительности обработки при работе инструментом с умеренным притуплением режущих зерен в условиях обеспечения повышенного темпа принудительного изнашивания связки [1, 2]. Получение взаимосвязанных с параметрами рельефа алмазного круга аналитических выражений шероховатости и производительности обработки, удобных практическому технологу для определения доступных в реальных условиях путей эффективного решения заданий на механическую обработку, является важной задачей поддержки современных гибких машиностроительных производств.

**Основная часть.** Определим параметр шероховатости обработки  $R_{max}$  с учетом условия стабилизации режущего рельефа круга. Для этого воспользуемся условием равенства  $R_{max}$ , максимальной (вероятностной) толщины среза  $H_{max}$  и глубины шлифования  $t$ , приведенным в работе [3]:

$$R_{max} = H_{max} = t, \quad (1)$$

где параметр  $H_{max}$  определяется зависимостью:

$$H_{max} = 1 - \eta \cdot H, \quad (2)$$

где  $H$  – максимальная глубина внедрения обрабатываемого материала в рабочую поверхность круга, отсчитывая ее от вершины исходного (неизношенного) максимально выступающего над уровнем связки зерна, м;  $\eta = \frac{x}{H}$  – безразмерный коэффициент, учитывающий степень затупления зерна ( $\eta \rightarrow 0$  – для острого зерна,  $\eta \rightarrow 1$  – для затупленного зерна);  $x$  – величина линейного износа максимально выступающего над уровнем связки зерна, м.

Параметры  $H$  и  $\eta$  могут быть представлены в виде:

$$H = \sqrt[3]{\frac{9 \cdot b \cdot V'_{dem}}{tg \gamma \cdot k \cdot V_{кр} \cdot (1 - \eta^2)}}, \quad (3)$$

$$\eta = \sqrt{1 - \frac{k^2 \cdot V_{кр}^2 \cdot S_{пред}^3}{81 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot b^2 \cdot V_{дет}^{\prime 2}}}; \quad (4)$$

где  $b$  – максимальная высота выступания зерен над уровнем связки круга,  $m$ ;  $k$  – поверхностная концентрация зерен круга,  $\text{шт}/m^2$ ;  $2\gamma$  – угол при вершине конусообразного режущего зерна;  $S_{пред}$  – предельная площадь поперечного сечения среза отдельным зерном круга, обусловленная собственно прочностью зерна или прочностью его удержания в связке круга (в зависимости от типа связки и механизма износа алмазного круга),  $m^2$ ;  $V_{кр}$  – скорость круга,  $m/c$ ;  $V_{дет}'$  – скорость подачи обрабатываемого прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга,  $m/c$ .

После соответствующих преобразований (1) имеем

$$R_{\max} = \sqrt[5]{\frac{1-\eta^4}{1+\eta^2} \cdot \frac{18 \cdot 10^4 \cdot \pi^2 \cdot \bar{X}^6 \cdot V_{дет}^2 \cdot \rho}{\operatorname{tg}^2 \gamma \cdot m^2 \cdot V_{кр}^2}}, \quad (5)$$

где  $\bar{X}$  – зернистость круга,  $m$ ;  $m$  – объемная концентрация зерен круга;  $\rho = \frac{1}{R_{кр}} + \frac{1}{R_{дет}}$ ;  $R_{кр}$ ,

$R_{дет}$  – соответственно радиусы круга и детали,  $m$ .

В зависимость (5) входит безразмерная величина  $\sqrt[5]{\frac{1-\eta^4}{1+\eta^2}}$ , которая определяет степень износа (сглаженность) режущего рельефа алмазного круга. С увеличением безразмерного коэффициента  $\eta$  параметр шероховатости обработки  $R_{\max}$  уменьшается.

Преобразуем зависимость (4) путем выражения параметра  $S_{пред}$  через силу резания, действующую на отдельное зерно круга. Будем считать, что объемное разрушение зерна или его выпадение из связки без разрушения (в зависимости от прочности удержания зерна в связке) происходит от действия радиальной составляющей силы резания  $P_{y1}$ , действующей на зерно, так как  $P_{y1} > P_{z1}$ , где  $P_{z1}$  – тангенциальная составляющая силы резания, действующая на зерно. Как показано в работе [4], в этом случае

$$S_{пред} = \frac{P_{y1}}{2 \cdot \sigma_{сж}} \cdot (1 - \eta), \quad (6)$$

где  $\sigma_{сж}$  – предел прочности обрабатываемого материала на сжатие,  $H/m^2$ .

С использованием (6) зависимости (4), (3) и (2) соответственно примут вид [5]:

$$\eta = 1 - \frac{9 \cdot b \cdot V_{дет}'}{\operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{кр}} \cdot \left( \frac{2 \cdot \sigma_{сж}}{P_{y1}} \right)^{1,5}, \quad (7)$$

$$H = \left( \frac{P_{y1}}{2 \cdot \sigma_{сж}} \right)^{0,5}, \quad (8)$$

$$H_{\max} = \frac{9 \cdot b \cdot V_{дет}'}{\operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{кр}} \cdot \left( \frac{2 \cdot \sigma_{сж}}{P_{y1}} \right). \quad (9)$$

Применительно к круглому наружному (плоскому) шлифованию, преобразуем зависимость (7) с учетом известного соотношения [6]:  $V'_{дет} = V_{дет} \cdot \sqrt{2 \cdot t \cdot \rho}$ , а также соотношений [7]:  $b = 1 - \varepsilon \cdot \bar{X}$ ;  $k = \frac{3 \cdot m \cdot 1 - \varepsilon}{200 \cdot \pi \cdot \bar{X}^2}$ , где  $1 - \varepsilon$  – коэффициент, учитывающий степень выступания зерен над уровнем связки;  $V_{дет}$  – скорость детали, м/с.

Тогда

$$\eta = 1 - \frac{600 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{2 \cdot t \cdot \rho}}{tg \gamma \cdot m \cdot V_{кр}} \cdot \left( \frac{2 \cdot \sigma_{сж}}{P_{y1}} \right)^{1.5}, \quad (10)$$

Подставим в зависимость (5) зависимость (10), пренебрегая множителем  $1 + \eta \approx 1$ :

$$R_{max} = \sqrt[5]{\left[ \frac{600 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho}}{tg \gamma \cdot m \cdot V_{кр}} \cdot \left( \frac{2 \cdot \sigma_{сж}}{P_{y1}} \right) \right]^6} \cdot t^2. \quad (11)$$

Как видим, при условии стабилизации режущего рельефа алмазного круга влияние параметров  $\bar{X}$ ,  $m$ ,  $V_{дет}$ ,  $V_{кр}$ ,  $\rho$  на параметр шероховатости обработки  $R_{max}$  усиливается. Имеет место увеличение  $R_{max}$  с увеличением глубины шлифования  $t$ . Следовательно, изменение параметров режущего рельефа круга ведет к существенному изменению шероховатости обработанной поверхности.

Рассмотрим влияние механизма износа круга на параметры его режущего рельефа.

Приведенные выше аналитические зависимости справедливы для условий:  $b \geq H$  и  $P_{y1} = P$ , где  $P$  – сила, при которой происходит разрушение (раздавливание) режущего зерна. Если из расчетов вытекает, что  $H > b$ , то предельное значение радиальной составляющей силы резания  $P_{y1}$ , действующей на отдельное зерно, будет меньше  $P$  и равно силе, удерживающей зерно в связке. В этом случае объемное разрушение зерен не произойдет, зерна будут выпадать из связки под действием силы  $P_{y1} < P$ .

Рассмотрим условие устойчивости зерна в связке от действия радиальной составляющей силы резания  $P_{y1}$ , действующей на отдельное зерно.

Радиальная составляющая силы резания  $P_{y1}$ , действующая на отдельное зерно, условно определяется (рис. 1)

$$P_{y1} = a \cdot \bar{X} - H, \quad (12)$$

где  $a$  – размерный коэффициент, зависящий от прочности связки круга (чем прочнее связка, тем больше коэффициент  $a$ ).

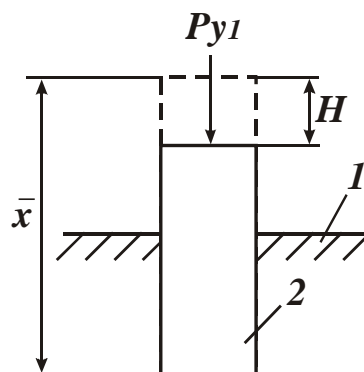


Рисунок 1 – Расчетная схема устойчивости зерна в связке:

1 – связка круга; 2 – режущее зерно

Из зависимости (12) следует, что с увеличением параметра  $H=b$  (вследствие уменьшения глубины залегания зерна в связке круга) радиальная составляющая силы резания  $P_{y1}$ , действующая на отдельное зерно, уменьшается.

Подставим зависимость (12) в зависимость (8):

$$H^2 + \frac{a}{2 \cdot \sigma_{сж}} \cdot H - \frac{a \cdot \bar{X}}{2 \cdot \sigma_{сж}} = 0. \quad (13)$$

После несложных преобразований приходим к квадратному уравнению относительно неизвестной величины  $H$ .

Решение уравнения имеет вид:

$$H = \frac{\bar{X}}{\left( \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{2 \cdot \sigma_{сж} \cdot \bar{X}}{a}} \right)}. \quad (14)$$

Знаменатель зависимости (14) больше единицы, поэтому  $H < \bar{X}$ . Чем больше предел прочности на сжатие обрабатываемого материала  $\sigma_{сж}$  и меньше коэффициент  $a$ , тем меньше величина  $H$ . Следовательно, с уменьшением прочности удержания зерна в связке величина  $H = b$  уменьшается.

Подставим зависимость (14) в зависимость (12). После преобразований, имеем

$$P_{y1} = \frac{2 \cdot \sigma_{сж} \cdot \bar{X}}{\left( \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{2 \cdot \sigma_{сж} \cdot \bar{X}}{a}} \right)}. \quad (15)$$

Нетрудно видеть, что с увеличением параметров  $\sigma_{сж}$ ,  $\bar{X}$  и  $a$  радиальная составляющая силы резания  $P_{y1}$ , действующая на отдельное зерно, увеличивается.

Из зависимостей (7) и (9) следует, что с увеличением  $P_{y1}$  безразмерный коэффициент  $\eta$  увеличивается, а  $H_{max}$  уменьшается. Следовательно, с увеличением прочности удержания зерна в связке (с увеличением коэффициента  $a$ ) максимальная (вероятностная) толщина среза  $H_{max}$  уменьшается, а безразмерный коэффициент  $\eta$  увеличивается (режущий рельеф круга становится более сглаженным).

Как видим, все основные параметры шлифования (в случае, когда в механизме износа круга преобладает выпадение зерен из связки без их объемного разрушения) определяются прочностными свойствами связки круга и обрабатываемого материала, а также зернистостью круга  $\bar{X}$ . Параметры режима шлифования влияния не оказывают.

Выразим в зависимости (14) параметр  $H$  зависимостью (3) и разрешим полученное выражение относительно скорости детали  $V'_{дет}$ :

$$V'_{дет} = \frac{tg \gamma \cdot k \cdot V_{кр} \cdot 1 - \eta}{9 \cdot b} \cdot \left( \frac{\bar{X}}{\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{2 \cdot \sigma_{сж} \cdot \bar{X}}{a}}} \right)^3. \quad (16)$$

Определим производительность обработки  $Q = V'_{дет} \cdot F$ , где  $F$  – площадь поперечного сечения обрабатываемого образца,  $m^2$ . Для этого преобразуем зависимость (16) с учетом известных, приведенных выше, соотношений [7]:  $b = 1 - \varepsilon \cdot \bar{X}$ ;

$k = \frac{3 \cdot m \cdot 1 - \varepsilon}{200 \cdot \pi \cdot \bar{X}^2}$ , где  $1 - \varepsilon$  – коэффициент, определяющий степень выступления зерен над уровнем связки:

$$Q = \frac{tg\gamma \cdot m \cdot V_{кр} \cdot 1 - \eta \cdot F}{600 \cdot \pi} \cdot \left( \frac{1}{\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{2 \cdot \sigma_{сж} \cdot \bar{X}}{a}}} \right)^3. \quad (17)$$

Как следует из зависимости (17), увеличить производительность обработки  $Q$  можно увеличением параметров  $m$ ,  $V_{кр}$ ,  $F$  и уменьшением безразмерного коэффициента  $\eta$ .

Данное решение получено для случая  $H = b$ . В реальных условиях шлифования параметр  $H$  всегда меньше максимальной высоты выступления режущих зерен над уровнем связки круга  $b$  на величину, равную высоте межзеренного пространства круга  $\Delta$ , занимаемого образующимися стружками и другими продуктами обработки.

Для того чтобы учесть указанную высоту, необходимо рассматривать вместо величины  $\bar{X}$  величину  $\bar{X} - \Delta$ . Очевидно, это приведет к уменьшению параметра  $H$ .

Однако, не столь значительно, т.к.  $\bar{X} \gg \Delta$ . Поэтому можно считать, что параметр  $H$ , скорость детали  $V'_{дет}$  и соответственно производительность обработки  $Q$  обусловлены устойчивостью зерен в связке, определяемой прочностными свойствами связки круга и обрабатываемого материала.

Следует отметить, что данный вывод справедлив для случая, когда в механизме износа круга преобладает выпадение зерен из связки без их объемного разрушения. В случае, когда в механизме износа круга преобладает объемное разрушение зерен и их последующее выпадение из связки, параметры  $H$  и  $H_{max}$  будут определяться зависимостями (8) и (9). В этих зависимостях радиальную составляющую силы резания  $P_{y1}$ , действующую на максимально выступающее из связки зерно, необходимо рассматривать равной предельной силе, при которой происходит объемное разрушение (раздавливание) алмазного зерна.

**Выводы.** Полученные выражения шероховатости и производительности, основанные на аналитической методологии Ф.В. Новикова и А.В. Якімова [1-4], связывают эти важнейшие выходные показатели механической обработки шлифованием с высотными параметрами режущего рельефа круга. Использование этих зависимостей на практике ориентировано на процессы обработки с возможностью обеспечения устойчивости параметров рельефа инструмента, например, при алмазно-искровом шлифовании с управлением электрическими режимами эрозионного разрушения связки круга электрическими разрядами, согласованного с контактным износом режущих зерен. На основании полученных аналитических результатов в таких условиях возможно принимать обоснованные технологические решения для выполнения конкретных производственных задач.

**Литература:** 1. Новиков, Ф. В. Качество обработки деталей машин / Ф. В. Новиков, А. В. Якімов, Г. В. Новиков и др. // Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якімова. В десяти томах. – Т. 6. – Одесса : ОНПУ, 2003. – 716 с.  
2. Новиков, Ф. В. Проектирование технологических процессов в машиностроении /

Ф. В. Новиков, А. В. Якимов, Г. В. Новиков и др. // Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якімова. В десяти томах. – Т. 9. – Одесса : ОНПУ, 2005. – 584 с.

3. Якимов, А. В. Теоретические основы резания и шлифования материалов: Учеб. пособие / А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, Г. В. Новиков, Б. С. Серов, А. А. Якімов. – Одесса : ОГПУ, 1999. – 450 с.

4. Новиков, Ф. В. Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов / Ф. В. Новиков, А. В. Якимов, Г. В. Новиков и др. // Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якімова. В десяти томах. – Т. 4. – Одесса : ОНПУ, 2002. – 802 с.

5. Новиков, Ф. В. Формирование рабочей поверхности алмазного круга в процессе шлифования / Ф. В. Новиков, Ю. Г. Гуцаленко // Вісн. Нац. техн. ун-ту «Харк. політехн. ін-т»: Зб. наук. пр. Тем. вип. : Технології в машинобудуванні. –2002. – № 9, т. 10. – С. 115-120.

6. Новиков, Ф. В. Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования : Дис... д-ра техн. наук: 05.02.08 – технология машиностроения; 05.03.01 – процессы механической обработки, станки и инструменты / Ф. В. Новиков; Харьковское НПО «Прогресс» (вып.); Одес. гос. политехн. ун-т (защита). – Одесса, 1995. – 438 с.

7. Абразивная и алмазная обработка материалов : Справочник / Под ред. А. Н. Резникова. – М. : Машиностроение, 1977. – 390 с.